

一般財団法人新潟県建設技術センター

平成29年度研究助成事業

塩害を受けた撤去桁の劣化詳細調査および
点検研修施設としての活用

報 告 書

新潟大学 佐伯竜彦

1. はじめに

現在、高度経済成長期に建設されたインフラの一斉老朽化が急速に進んでおり、特に日本海側沿岸の橋梁は、冬期の季節風に伴う飛来塩分の影響により、塩害による劣化が深刻化している。今後、限られた予算、人員で膨大な量の橋梁の維持管理する必要があり、効果的、効率的な維持管理が求められている。そのためには、これまで以上に詳細な劣化状況の把握、劣化進行予測が重要である。

しかしながら、劣化進行予測についての既往の研究の多くは、室内実験によるものであり、作製した供試体を促進的に劣化進行させることによって得られたデータがその大半である。実構造物は、施工等の影響で構造物全体が均一とは限らず、また、局所的環境も均一でないことから、劣化状況は部位によって異なる。このため、小型の供試体を使用した実験だけでは、実構造物の劣化進行を評価することは難しい。

また、塩害劣化した実橋梁を調査・研究対象とした例は多いものの、供用中の橋梁では、破壊試験が行えない等、調査手法が限定される。また、撤去後の部材を詳細に調査した事例はあるもののその数は少ない。外観調査、非破壊試験、破壊試験等を総合的に行つた調査研究、また劣化の原因について言及したものはごく僅かであり、劣化しやすい部位部材の解明等も進んでいない。

そこで本研究は、実構造物における劣化状況の詳細な知見を得ることを目的として、新潟県沿岸で40年以上使用され、撤去された歌高架橋（新潟県糸魚川市）のPC桁を研究対象とし、外観調査、非破壊試験、破壊試験を行った。また、各種試験結果の相関、桁の部位毎による塩害劣化の程度や原因について考察を行った。

一方で、多数の構造物を適切に維持管理していくためには適切な点検・評価が重要であるが、現状ではこのための人材が不足しており、人材育成のための教育システムの整備が重要である。このような人材の育成には、座学のみでは不十分であり、実地の研修が不可欠である。しかし、供用中の実構造物では限界があり、撤去構造物を利用した常設の研修施設が必要である。数年前に名古屋大学に先駆的な施設が設けられて後、全国的各地に類似の施設が計画されているが、新潟県内ではそのような施設が無い。実際の環境条件に曝された撤去部材を用いることにより、地域の特徴的な劣化現象が把握でき、実践的な点検研修が行えることになる。そこで本研究では、詳細調査を行った撤去桁を、新潟大学に将来設置予定の点検研修施設における実習に活用することとした。前述のように撤去桁の詳細調査を行っていることから、点検・診断の「正解」が得られていることになり、研修効果の向上に資するものと考えられる。

2. 調査対象

2.1 歌高架橋の概要

(1) 歌高架橋の概要

歌高架橋の諸元を下記に示す。

橋長 : 991.6m

橋梁形式 : 鋼単純鉢桁橋 (1 径間) + PC 単純ボルテン T 桁橋 (31 径間)

下部工形式 : 逆 T 式橋台, 張出し式橋脚

基礎形式 : 直接基礎

架設年次 : 昭和 50 年 (1975 年)

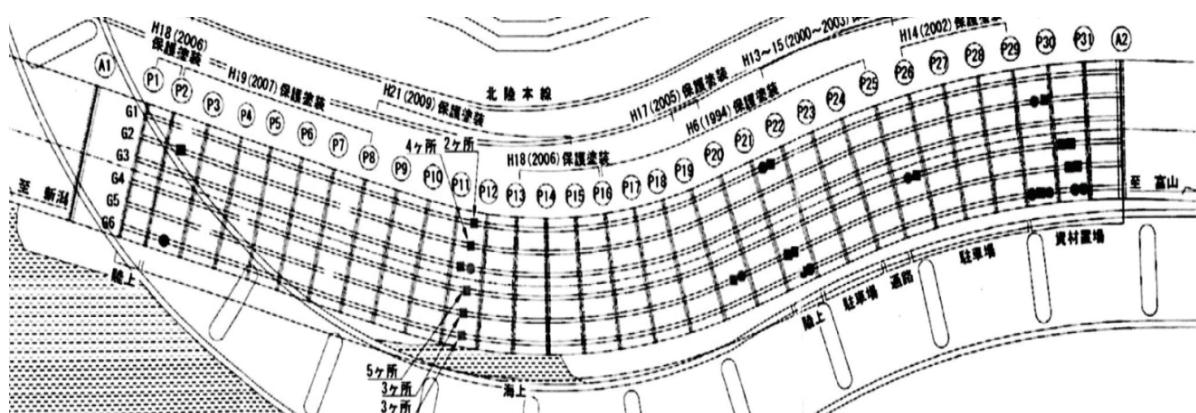


図 2-1 歌高架橋平面図

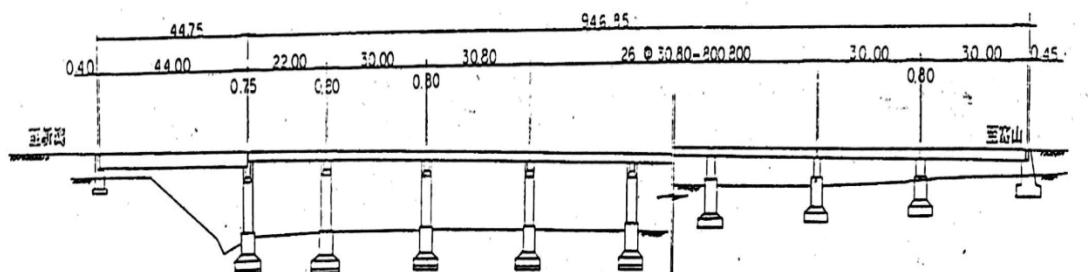


図 2-2 歌高架橋側面図

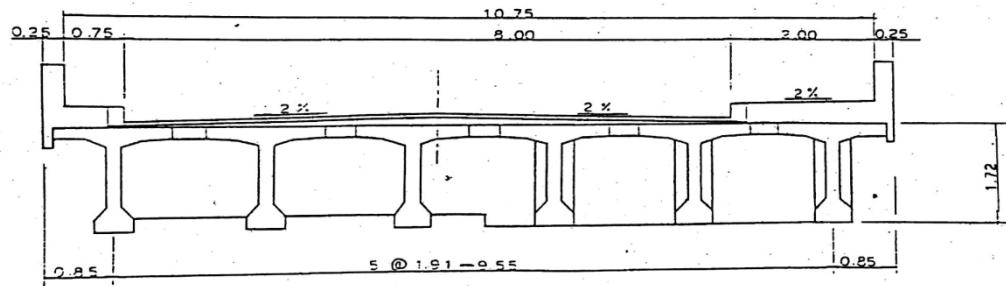


図 2-3 歌高架橋断面図

立地条件としては、写真 2-1 に示されるように、海岸線に位置し、塩害橋梁維持管理マニュアルによる塩害対策区分は、S（海岸線から 0m）とされている。



写真 2-1 歌高架橋全景

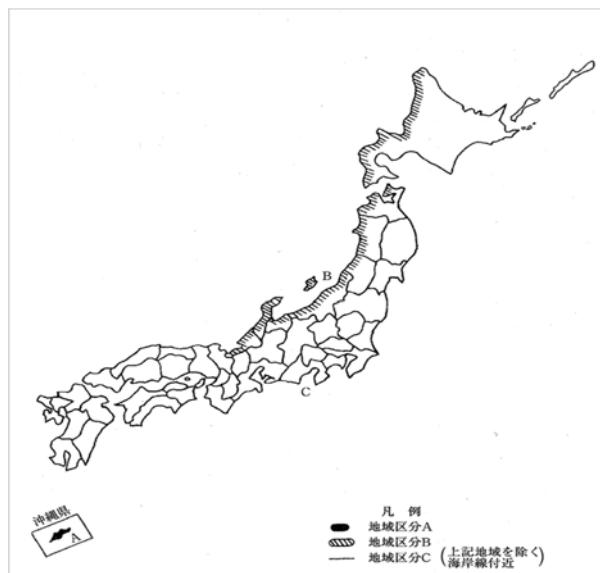


図 2-4 塩害対策地域区分

対象橋梁は、日本海からの飛来塩分等に由来する塩害によりひび割れ、浮き、剥落等の損傷が確認された。架橋から 10 年経過した 1985 年度から、塩害対策補修工事が複数回行われているが、補修を実施した箇所が再劣化する事例も確認されている。上部工の補修履歴を以下の表 2-1 に示す。

表 2-1 上部工補修履歴

実施年度	上部工	
	補修・補強履歴	
S53		
S57		
S59		・12～17 径間 : 断面修復、部分表面保護工（コンクリート塗装）
S62		・8～10 径間目 : 断面修復、表面保護工（コンクリート塗装）
S63		・5～7 径間目 : 断面修復、表面保護工（コンクリート塗装）
H1		・2～4 径間目 : 断面修復、表面保護工（コンクリート塗装）
H2		・11～13 径間目 : 断面修復、表面保護工（コンクリート塗装）
H3		・14～17 径間目 : 表面保護工（コンクリート塗装）
H4		
H6		
H7		・8 径間目 : 電気防食
H8		・9・10 径間目 : 炭素繊維補強、表面保護工（コンクリート塗装）
H12		・3～5・11 径間目 : 断面修復、表面保護工（コンクリート塗装）
H13		・1～3・5～7 径間目 : 断面修復、表面保護工（コンクリート塗装） ・4 径間目 : 脱塩 ・11 径間目 : 断面修復
H14		・1・2・10・13～17 径間目 : 断面修復、表面保護工（コンクリート塗装）
H15		・13～17 径間目 : 断面修復、表面保護工（コンクリート塗装）
H16		・1・2・13～17 : 断面修復、表面保護工（コンクリート塗装） ・12 径間目 : 電気防食、炭素繊維補強
H17		・6 径間目 : 断面修復、表面保護工（コンクリート塗装）
H18		・9・10 径間目 : 断面修復、表面保護工（コンクリート塗装）
H20		
H21		
H27		・4・6 径間目 : 断面修復、炭素繊維シート補強

2.2 入手した桁の概要

2017 年度に撤去作業を終えた P1-P5 径間で、選定できる桁のうち、山側下フランジ側面に多くの損傷が見られたブロック 1 を選定し、ブロック 1 と比較できるように並行する桁のもっとも海側である G6 のブロック 2 を選定した。また、PC 鋼材の上縁定着部の劣化を確認するため、ブロック 3 も選定した。

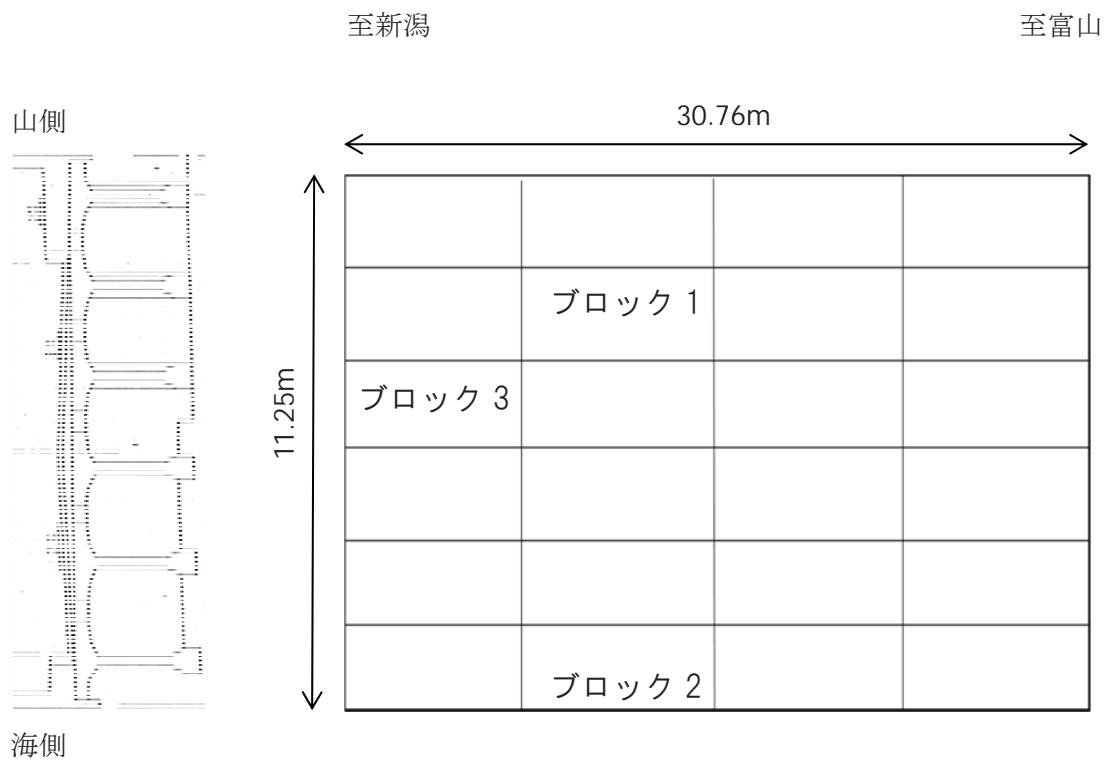


図 2-5 P4-5 桁ブロック図



写真 2-2 ブロック 1



写真 2-3 ブロック 1 海側ウェブ部分



写真 2-4 ブロック 1 山側下フランジ側

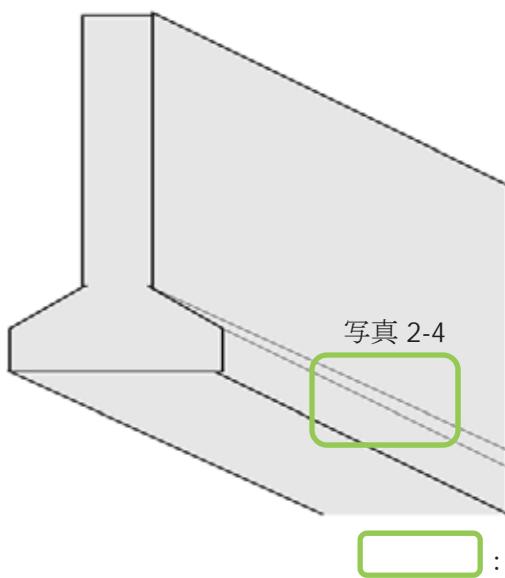


図 2-6 ブロック 1・山側

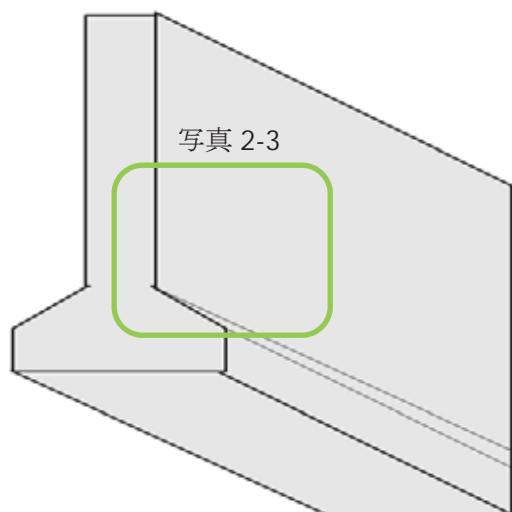


図 2-7 ブロック 1・海側



写真 2-5 ブロック 2



写真 2-6 ブロック 3

2.3 調査概要

選定した桁の中からもっとも劣化が多く見られたブロック 1 のウェブから下フランジにかけてハンドグラインダーにより表面塗膜を除去し、桁側面海側、山側 $2.7\text{m} \times 1.5\text{m}$ 、桁底面 $2.7\text{m} \times 0.3\text{m}$ の範囲で調査を行った。

桁の大学への搬入が予定より遅れたことと、調査後に研修施設の実習用部材として活用するため、今年度はブロック 1 のみの調査とした。

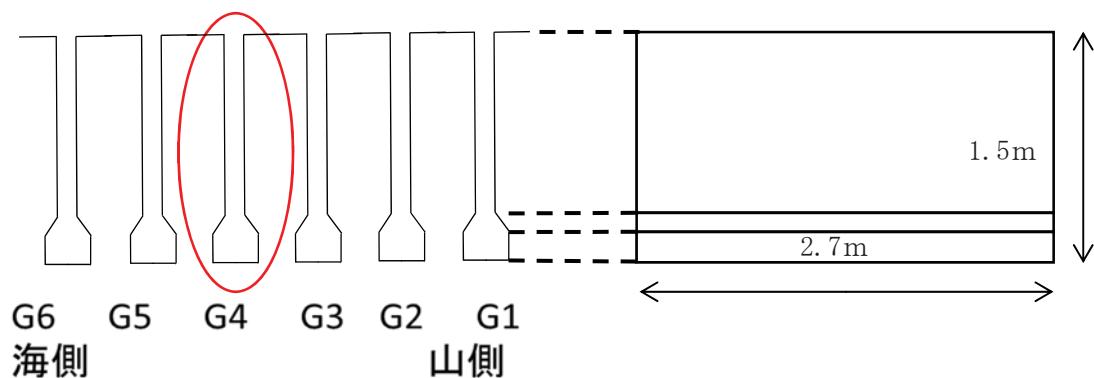


図 2-8 ブロック 1 断面図および側面図



写真 2-7 ブロック 1 表面塗膜除去後の外観

2.3.1 外観調査

外観調査は、ブロック1をハンドグラインダーにより、表面塗装を剥がした後、近接目視によりおこなったブロック2、3は表面塗膜を剥がさずに、近接目視により行った。損傷部を表した外観損傷図を作成した。

2.3.2 打音調査

ハンマーによる打音を聴音することによってコンクリート表面の健全性を評価した。打音の測定間隔は15cmとし、異音が確認された付近では重点的に打音を聴音した。

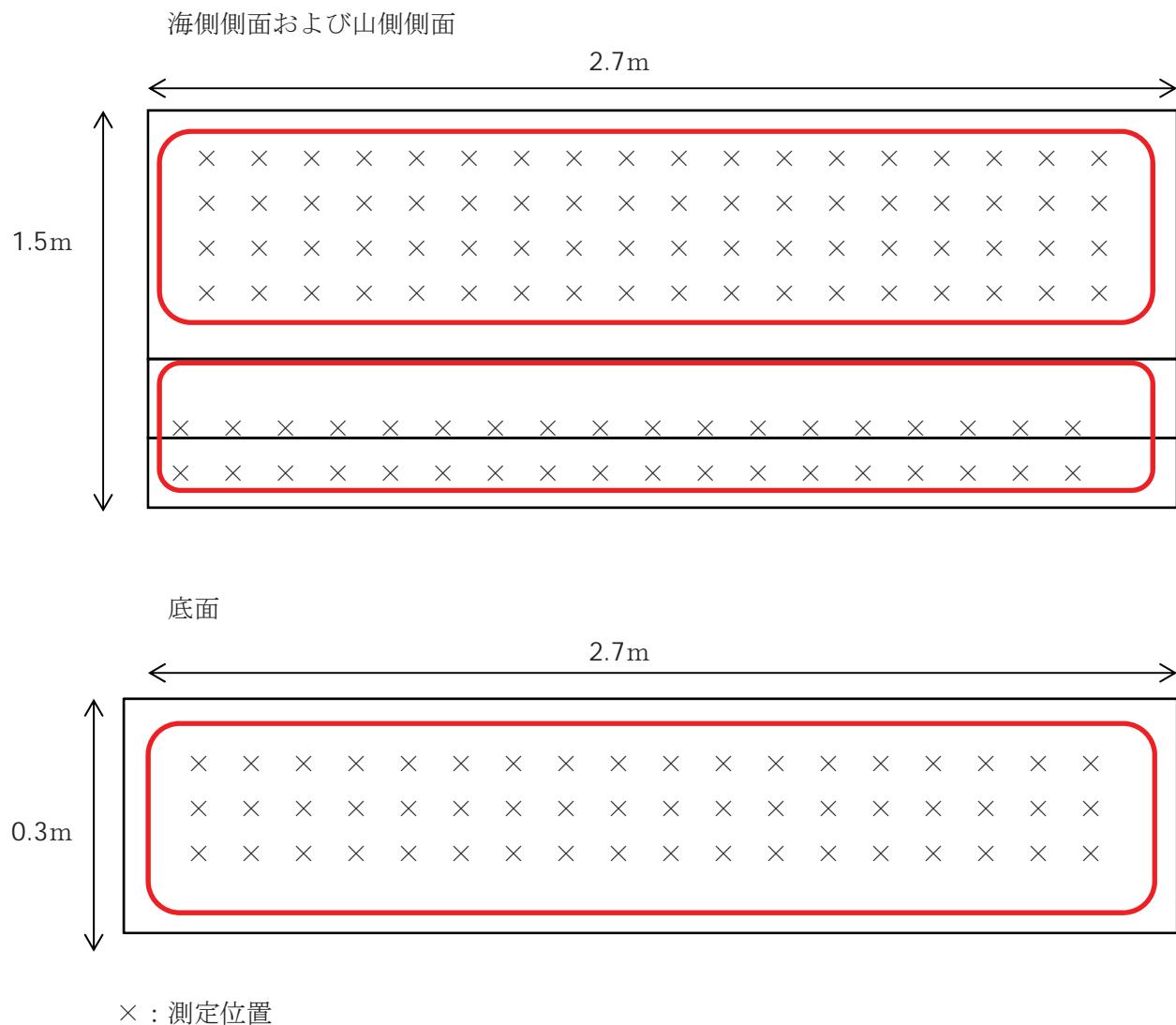


図2-9 打音調査位置

2.3.3 分極抵抗計測

Giatec 社製、非破壊型腐食探査機 iCOR を用いて分極抵抗を測定した。鉄筋位置上の 30cm 間隔、海側、山側それぞれ 32 点で測定を行い、腐食速度を表したコンターマップを作成した。まず、水道水によりコンクリート表面に 20 分程度散水を行い、機器（写真 2-8 (a) 参照）かぶり深さ、鉄筋間隔、測定間隔、鉄筋径、を入力し、測定器（写真 2-8 (b) 参照）を先ほど入力した測定位置に押し当てることでコンクリートの腐食速度 ($\mu\text{m}/\text{year}$) を測定した。



写真 2-8 iCOR 外観

2.3.4 塩分浸透量調査

JIS A 1154 附属書 A 「硬化コンクリート中に含まれる塩化物イオン分析用試料の採取方法」に準拠し、湿式で $\phi 75\text{mm}$ のコンクリートコアを採取した。欠損が多く、長さは異なっている。採取したコアを表面からコンクリートカッターで 5mm 深さの溝を作り、溝が消えるまでハンドグラインダーで 90 μm ふるいに全通するまで粉碎を行った。

次に粉碎した試料を 200ml ピーカーに 5g 程度測りとった。そしてピーカーに体積比 1 : 6 の硝酸水溶液 70ml と過酸化水素 1ml を加えて約 30 分間攪拌し、その後、約 5 分間煮沸した。煮沸後は、溶液が室温になるまで放置し、吸引濾過したのち、200ml に定量して試料溶液とした。試料溶液 5~40ml で分取し、イオン強度調整剤 1ml とイオン交換水 100ml 程度を加え、0.005mol/L 硝酸銀溶液で電位差滴定を行った。

試験後、塩分浸透総量を式(2.1)および(2.2)により算出した。

$$C = \frac{V_0 \times 0.000292 \times F}{W} \times \frac{200}{X} \times I \times 100 \quad (2.1)$$

ここに, C : 塩化物イオン量(wt% of sample)

V_0 : 0.005mol/l 硝酸銀溶液の使用量(ml)

F : 0.005mol/l 硝酸銀溶液のファクター

W : 試料のはかり取り量(g)

200 : 定容積(ml)

X : 試料溶液の分取量(ml)

I : 希釈倍率 本実験の場合 1

$$M_m = \frac{C}{100} \times \frac{m_d}{V} \quad (2.2)$$

ここに, M_m : 供試体の塩分浸透総量(kg/m³)

m_d : 供試体の絶乾質量(kg)

V : 供試体の体積(m³)

3. 調査結果

3.1 外観調査

ブロック 1 の外観損傷図を図 3-1 に示す.

ブロック 2 は、損傷は見られなかった.

ブロック 3 は、山側側面のみ損傷が見られたため、外観損傷図を図 3-2 に示す.

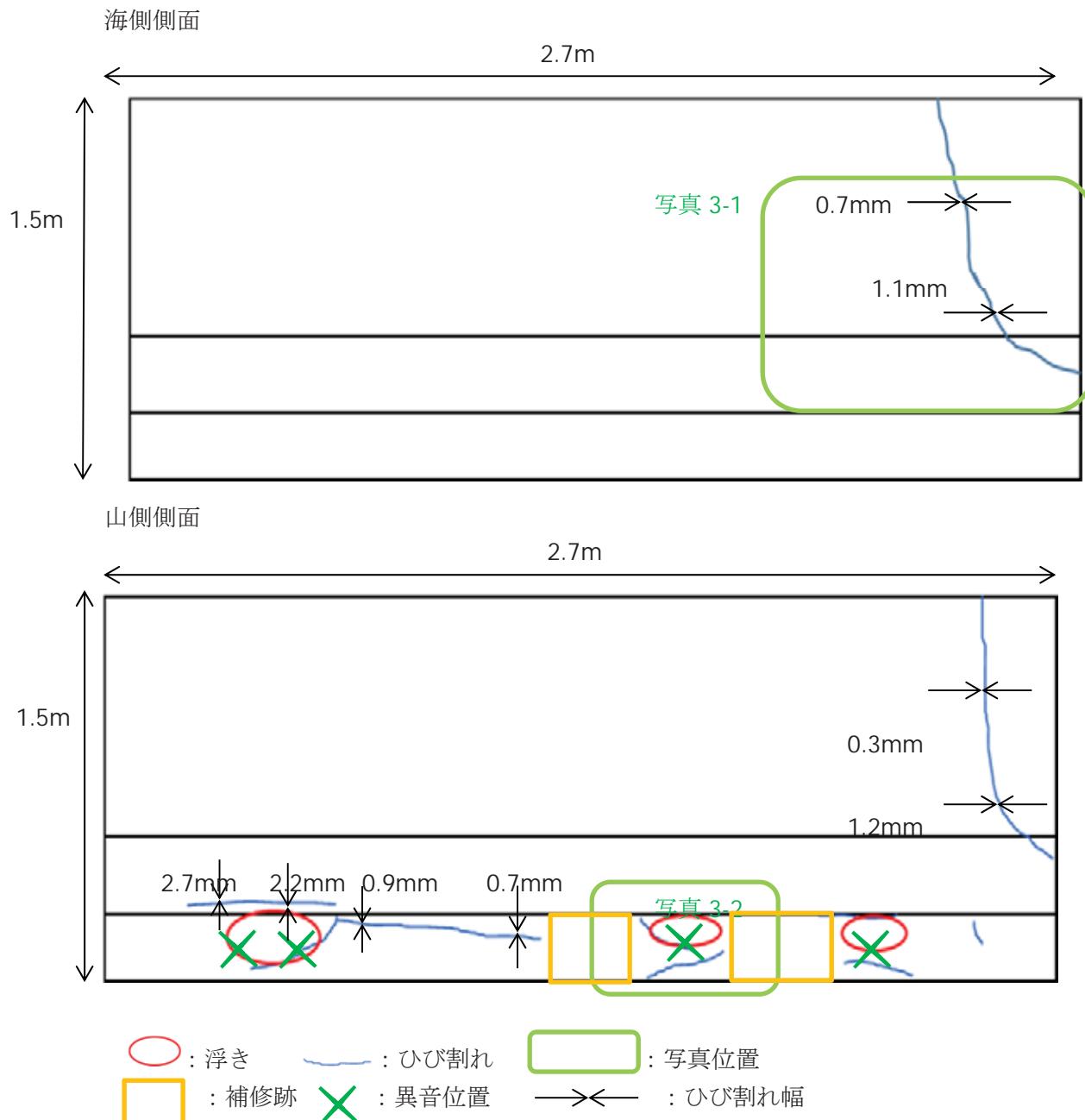


図 3-1 ブロック 1 外観損傷図

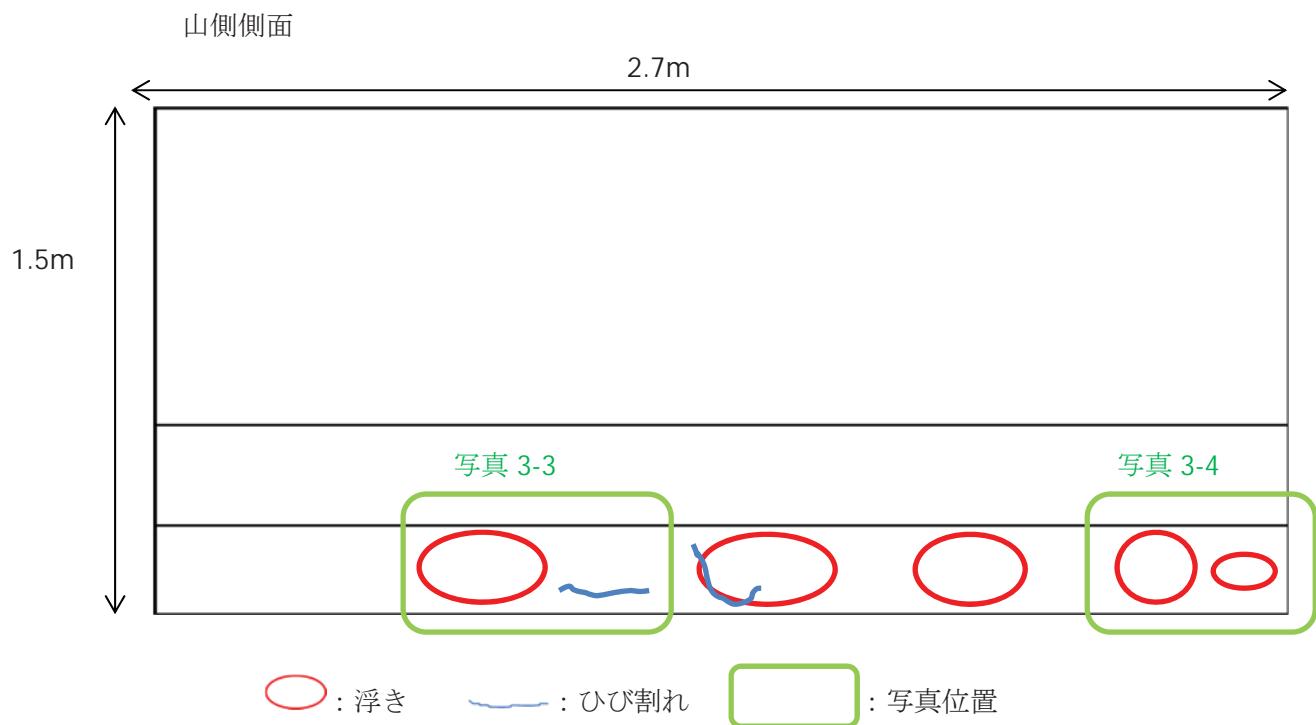


図 3-2 ブロック 3 外観損傷図



写真 3-1 ブロック 1 海側ウェブ



写真 3-2 ブロック 1 山側下フランジ側面



写真 3-3 ブロック 3 山側下フランジ側面



写真 3-4 ブロック 3 山側下フランジ側面

ブロック 1 は、山側下フランジ側面において、他の部位よりも多くの損傷が見られた。山側下フランジ側面には補修箇所があるが、それ以外の部分に損傷が生じていた。

ブロック 3 も同様に山側下フランジ側面にて浮き等が多く見られた。

また、ブロック 1 の海側・山側下フランジ側面においてかぶり深さを測定したところ、海側が 73mm、山側が 40mm であった。同様に、ブロック 3 の海側・山側下フランジ側面にてかぶり深さを測定したところ海側が 70mm、山側が 40mm であった。道路橋示方書の塩害対策例によると、塩害対策区分が S の地域の鉄筋かぶり厚さは 70mm 以上とされており、海側はその値を満たしているものの、山側は大幅に下回っている。そのため、下フランジ山側側面において多くの損傷が発生したと考えられる。



写真 3-5 ブロック 1 山側下フランジ側面のかぶり深さ



写真 3-6 ブロック 1 海側下フランジ側面のかぶり深さ



写真 3-7 ブロック 3 山側下フランジ側面のかぶり深さ



写真 3-8 ブロック 3 海側下フランジ側面のかぶり深さ

表 3-1 塩害の地域における最小かぶり (mm) (道路橋示方書IIIコンクリート橋編)

		上部構造			下部構造
		(1)工場で製作されるプレストレストコンクリート構造	(2)(1)以外のプレストレストコンクリート構造	(3)鉄筋コンクリート構造	はり、柱、壁
影響が激しい	S	70 *1		90 *2	
影響を受ける	I	50	70	90	
	II	35	50	70	
	III			50	
影響を受けない		道示III6.6.1「鋼材のかぶり」による			道示IV7.4「鉄筋のかぶり」による

*1 塗装鉄筋の使用又はコンクリート塗装を併用

*2 塗装鉄筋、コンクリート塗装、埋設型枠等を併用

(2) 対策区分SおよびI(RC上部構造)に対しては、(最小かぶり+対策工)の併用での対応を原則とする。

(3) 詳細設計時には劣化予測により対策工の妥当性を検証し最適工法を決定する。

3.2 打音調査

海側側面では異音はなく、山側側面の下フランジで異音が複数個所確認された。打音調査の結果は外観損傷の浮きの部分と一致し、コンクリート表面部の損傷を確認することができた。

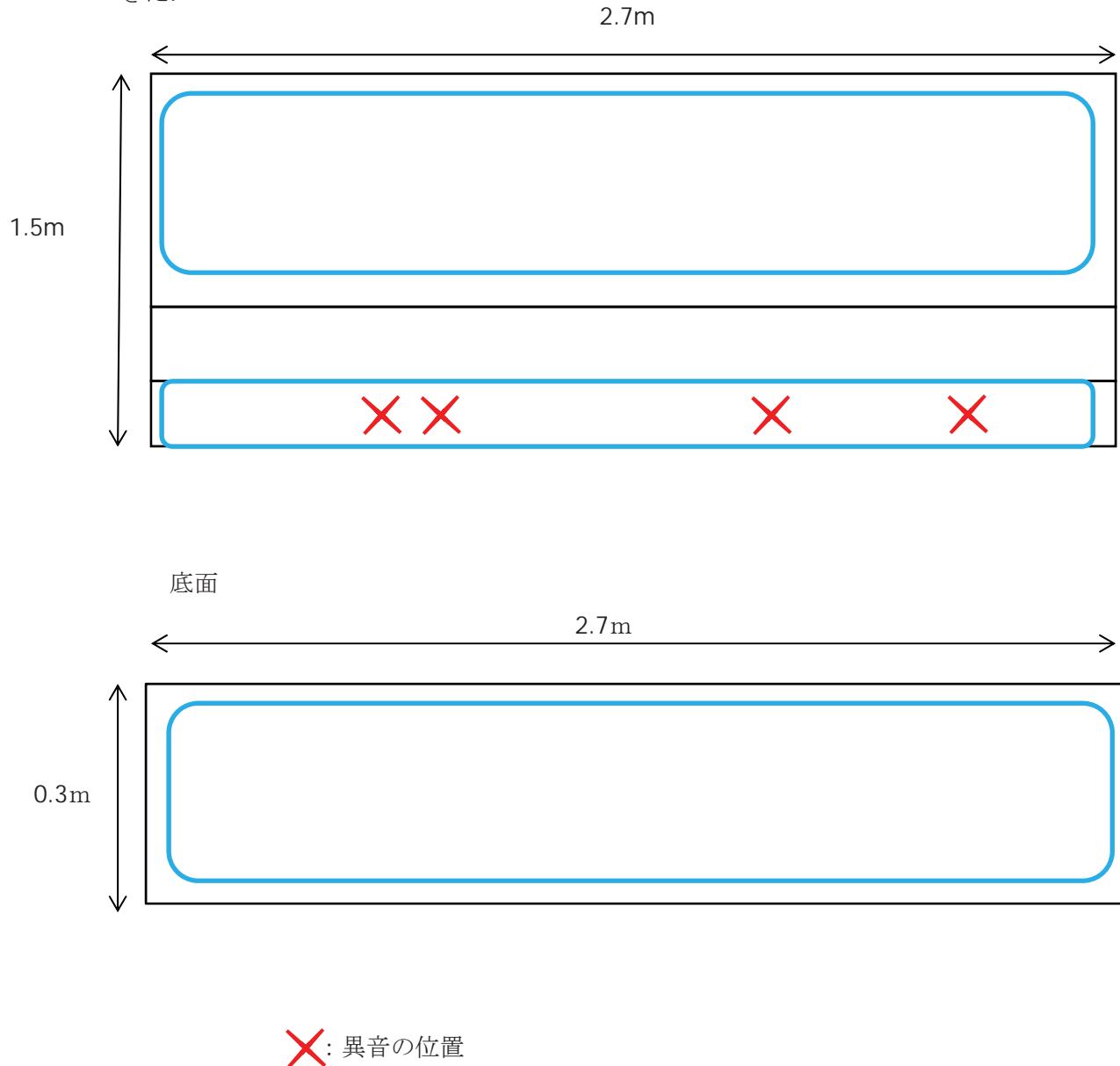
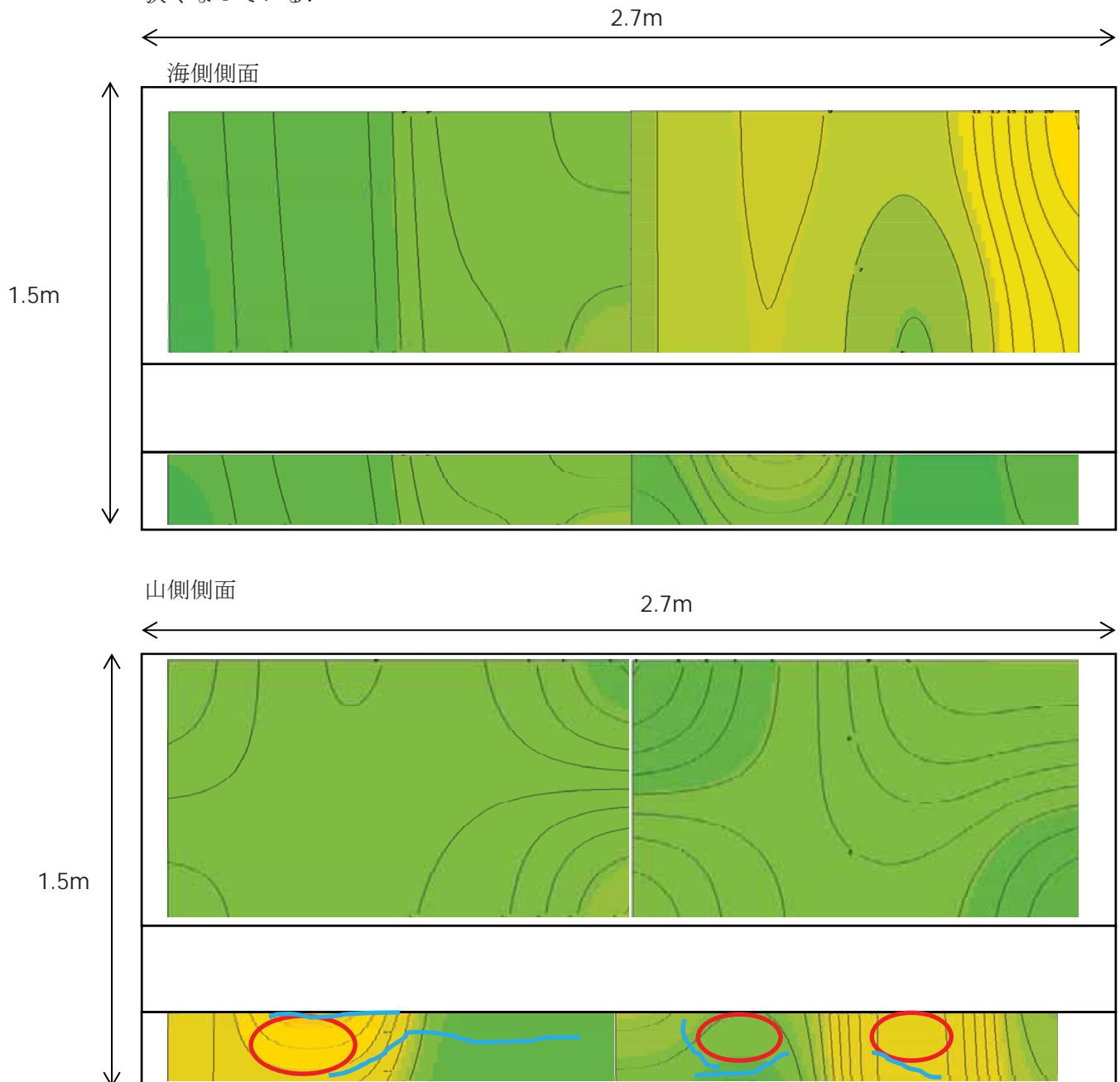


図 3-3 打音調査位置 ブロック 1 山側側面と底面

3.3 分極抵抗測定（腐食速度）

図3-4に、分極抵抗のコンターマップを示す。損傷の多かった山側下フランジ側面、海側ウェブ部分にて腐食速度が中程度を示した。中程度の腐食速度を示した部位は等電位線の間隔が狭くなっている。また、海側下フランジでは腐食速度は低いものの等電位線の間隔が狭くなっている。



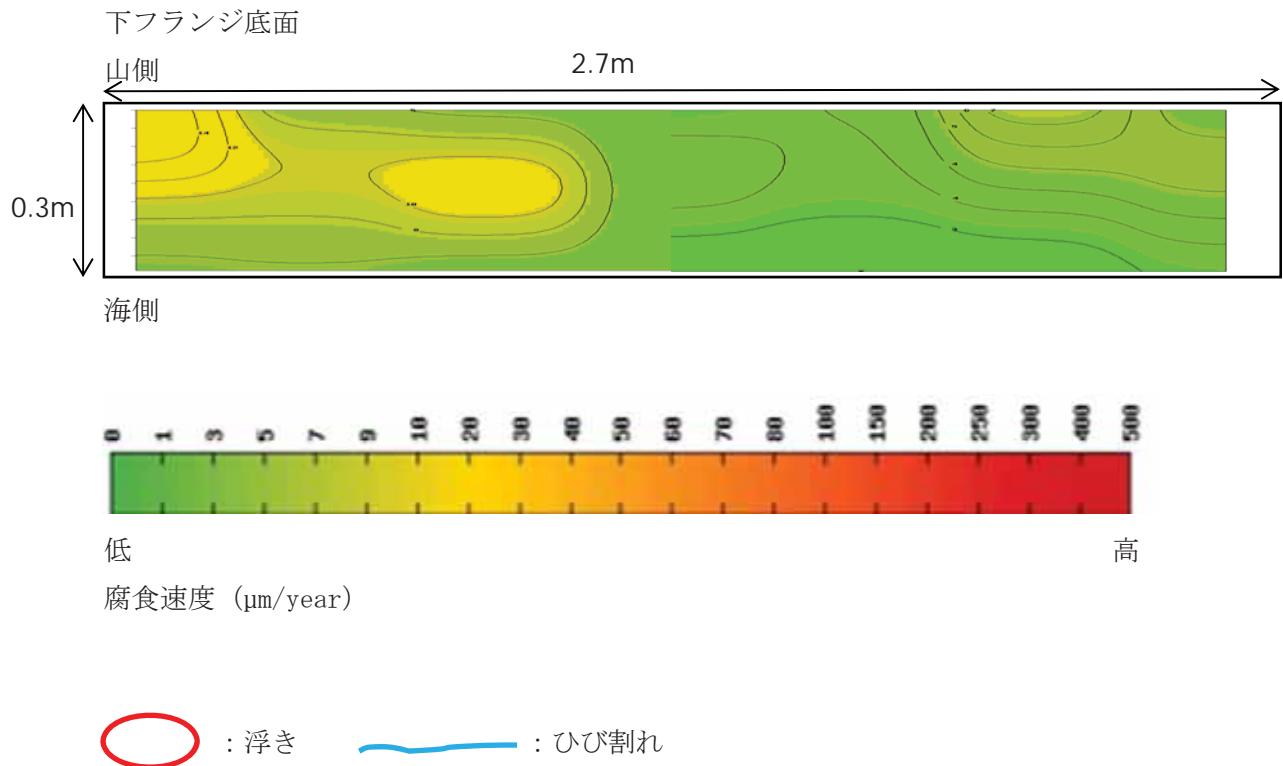


図 3-4 ブロック 1 腐食速度測定結果

山側下フランジ底面においては、外観損傷と打音による浮きの位置と対応するように腐食速度が中程度という結果を示した。しかし、海側ウェブ部分、下フランジ底面において損傷は見られなかったが、腐食速度が中程度を示す部分が一部見られ、相関がみられない結果となった。分極抵抗の測定値はかぶりコンクリートの品質や含水状態よっても変化するため、これらの影響を受けている可能性もある。また、分極抵抗は測定時の腐食速度を示すものであり、腐食によるひび割れや浮きは腐食量、即ち腐食速度の積分値を示すものであることから、単純に損傷箇所と腐食速度が大きい箇所はが一致しないことも考えられる。今後、鉄筋をはつり出しての調査や鉄筋近傍の塩化物イオン濃度の測定などにより、検討を行う予定である。

3. 4 塩分浸透量調査

塩分浸透量調査は、先行して行った外観調査、打音調査、分極抵抗計測から採取位置を決めた。

(1) ブロック 1 海側側面

海側側面におけるコア採取位置とコア番号を図 3-5 に示す。また、図 3-6 に各位置の塩化物イオン濃度分布を示す。

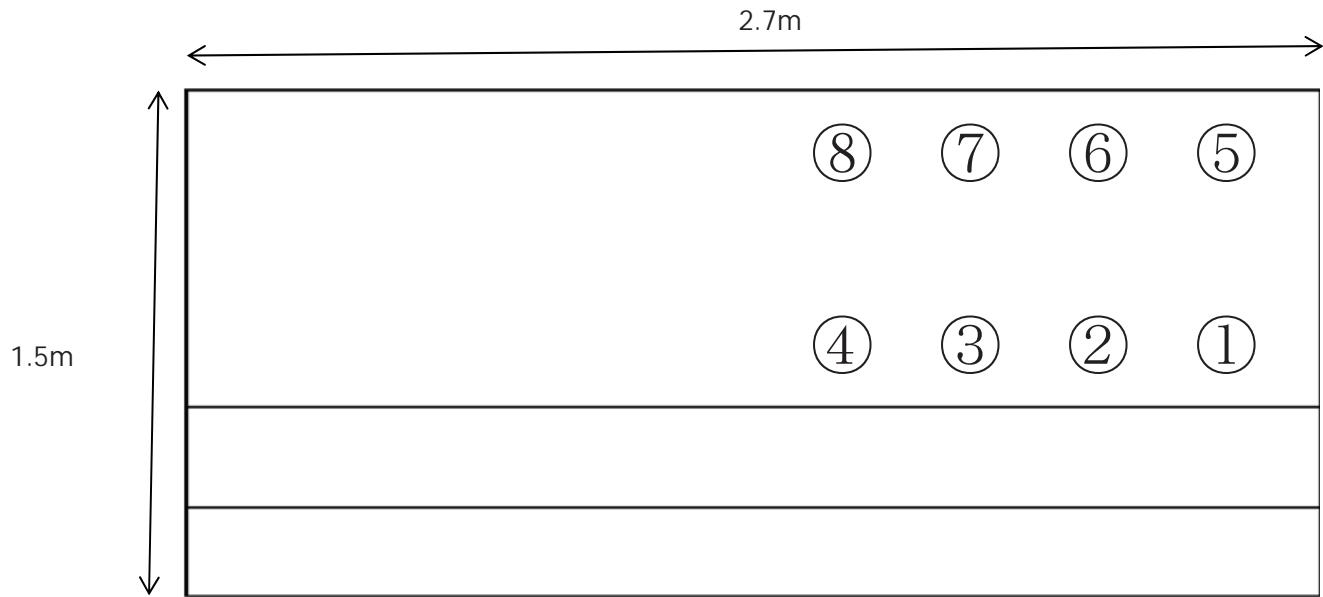


図 3-5 ブロック 1 海側側面コア採取位置

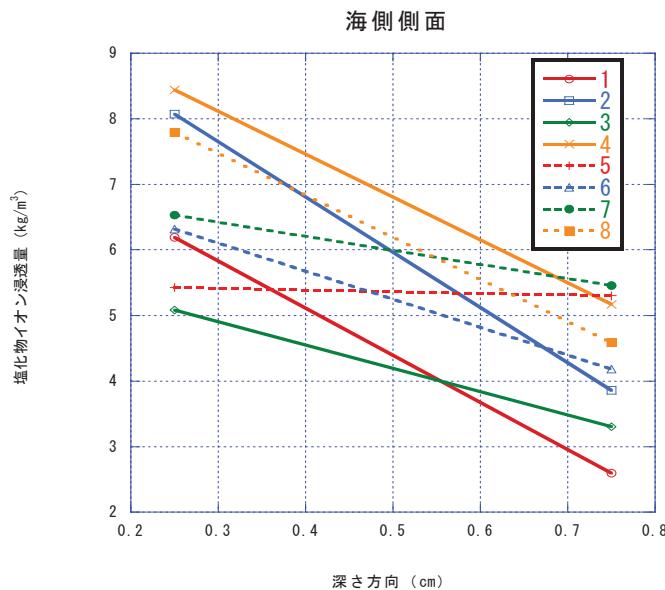


図 3-6 ブロック 1 海側側面塩化物イオン濃度分布

ブロック 1 海側側面では、ウェブ部分の腐食速度の調査結果との相関を確認するためにコアを採取した。腐食速度は測定箇所 1・5・7 が中程度の値を示していたが、他の低い値を示していた部分の塩分浸透量が多くなっており、コンクリート表面部分の塩分浸透量と分極抵抗に相関は見られなかった。(図 3-7 塩化物イオン浸透量と腐食速度の関係 参照)。当初、桁の搬入を 8 月下旬に予定していたが、12 月になったため、鋼材位置までの塩化物イオン浸透量測定が未実施である。今後、鋼材位置の塩分濃度と分極抵抗との関係を検討する予定である。

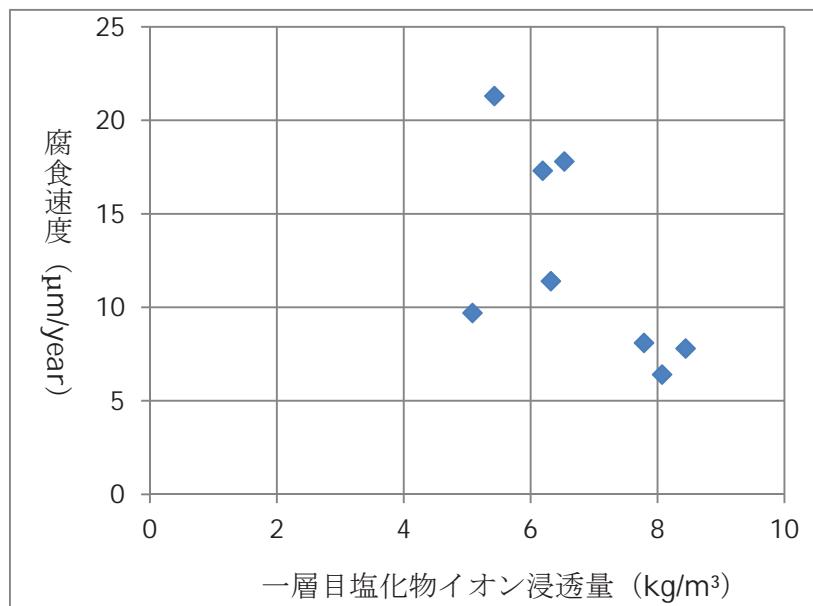


図 3-7 塩化物イオン浸透量と腐食速度の関係

(2) ブロック 1 山側側面

山側側面におけるコア採取位置とコア番号を図 3-8 に示す。また、図 3-9 に各位置の塩化物イオン濃度分布を示す。

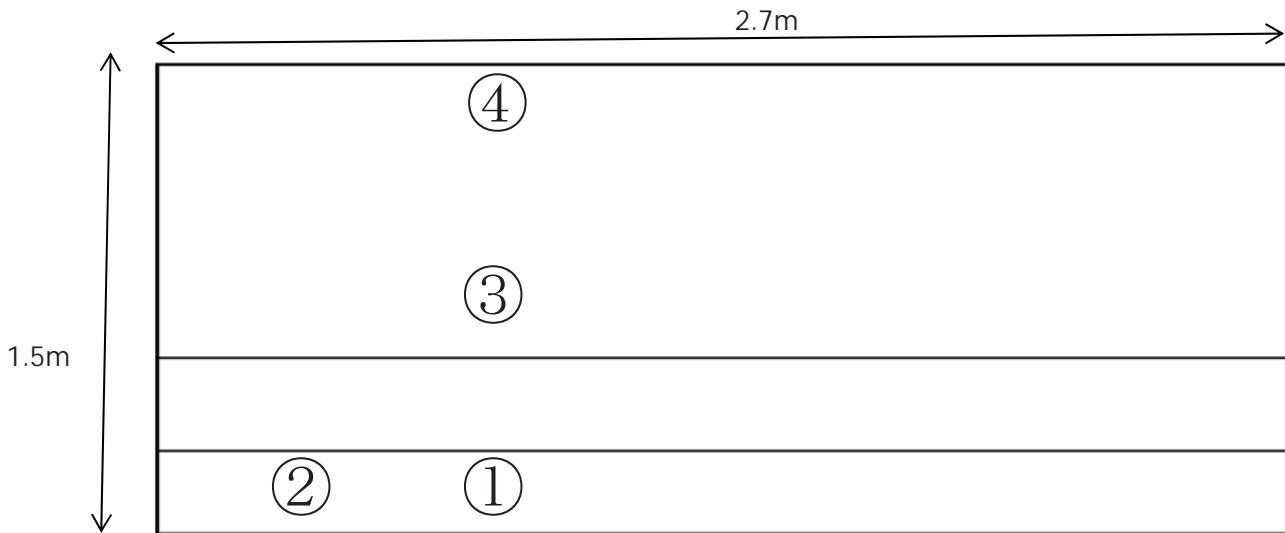


図 3-8 ブロック 1 山側側面コア採取位置

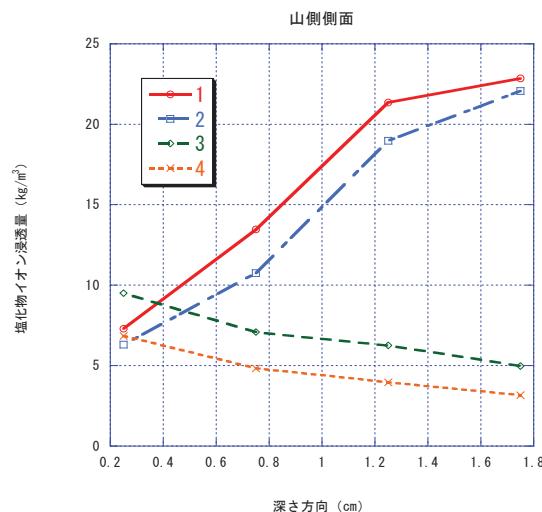


図 3-9 ブロック 1 山側側面塩化物イオン濃度分布

山側側面では、下フランジ側面の 1・2 が中性化の影響によると考えられる塩化物イオンの内部での濃縮現象が確認された。今後、中性化深さの測定を行い、確認する予定である。表面から 1, 2cm 以深の塩分浸透量では、1・2 が最も大きな値を示し、外観損傷、打音調査との相関がみられた。しかし腐食速度は、1 が低い値、2 が中程度を示しており、塩化物イオン濃度が同程度でも腐食速度に違いが見られた。

(3) ブロック 1 フランジ底面

フランジ底面におけるコア採取位置とコア番号を図 3-10 に示す。また、図 3-11 に各位位置の塩化物イオン濃度分布を示す。

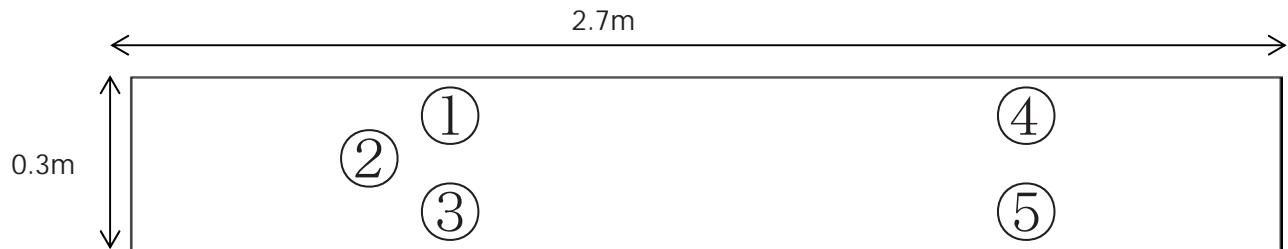


図 3-10 ブロック 1 フランジ底面コア採取位置

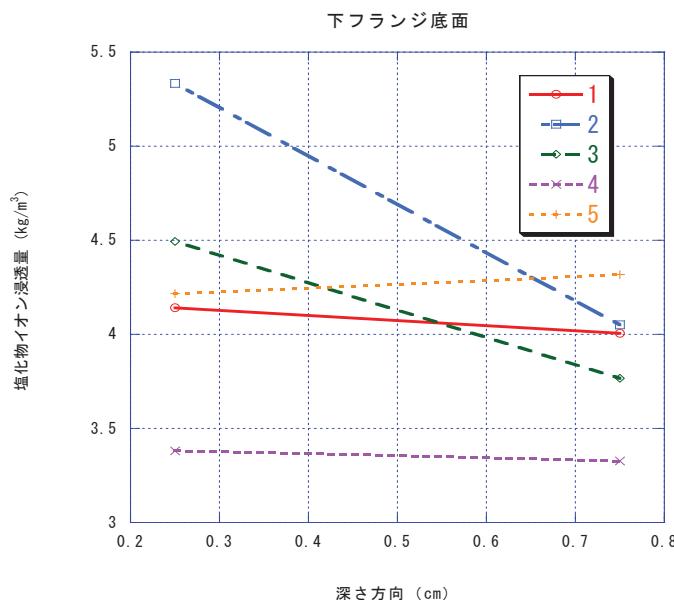


図 3-11 ブロック 1 下フランジ底面塩化物イオン濃度分布

下フランジ底面では、(1) の海側側面、(2) 山側側面と比べると塩分浸透量は全体的に少なかった。底面内での位置の影響を見ると、2 が中程度の腐食速度の値を示し、他の部分では低い値を示していた。図 3-9 より、2 が最も塩分浸透量が多い結果を示したため、両者に相関が見られる結果となった。海側、山側での比較（コア 1 と 3, 4 と 5 を比較）では明確な違いは見られなかった。

ブロック 1 は、海側から 3 番目の桁 (G4) である。図 3-12 に示される流体解析による上部工周辺の風速ベクトル図を見ると、G1 によって風が一度桁から剥離し、G4 の下フランジ山側側面に風が回り込んでいることがわかる。そのため、底面では付着する飛来塩分量が

少ないために、塩化物イオン浸透量が少なく、全体的に塩化物イオン浸透量が少なかったものと考えられる。

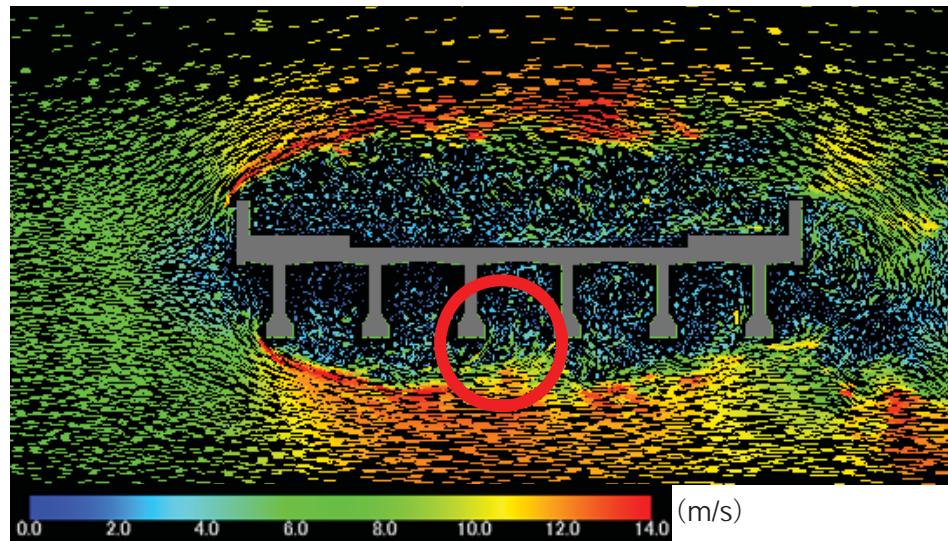


図 3-12 歌高架橋 流体解析結果

4.まとめ

山側下フランジ側面で、外観損傷が多くみられ、打音調査でも異音を示した。これは、かぶりが他の部位よりも薄いことが原因と考えられた。また、この部位では、塩化物イオンが他の部位より多く浸透していることが確認された。しかし、腐食速度は損傷位置と一致する箇所が一部あるものの、他の調査結果とは相関は低かった。

表3-2に、各種試験による評価結果の相関を示す。外観と打音調査の結果は良く一致しており、ひび割れや浮きなど、加速期以降の変状・損傷の確認・評価にはこれらの調査手法が有効であることが確認できる。一方、進展期以前の評価に有効と考えられる塩化物イオン浸透量と分極抵抗との相関は高くなかった。塩化物イオン浸透量は、むしろ外観・打音調査との相関が見られ、ひび割れなどの発生後に塩化物イオン浸透量が増加し、見かけ上相関が高くなった可能性も考えられる。

今後、構造物の維持管理を予防保全に転換していくためには、できるだけ早期の段階で劣化の進行を把握する必要があり、進展期以前の劣化進行を評価できる非破壊検査手法を確立し、現場に適用していくことが重要と考えられる。

表3-2 各試験の相関関係

	外観調査	打音調査	分極抵抗測定	塩化物イオン浸透量
外観調査	○	×	△	
打音調査	○	×	△	
分極抵抗測定	×	×		×
塩化物イオン浸透量	△	△	×	

○：一致する

△：おおむね一致する

×：ほとんど一致しない

図3-13は、ランダムウォークを用いた飛来塩分付着解析の結果である。図より、飛来塩分の付着量は、同一部材の同一面であっても濃淡があり、塩化物イオン濃度が一定でないことがわかる。3.3に示した分極抵抗の測定結果も同一面で値が異なっており、付着塩分量の違いが影響を及ぼしている可能性もある。実構造物においては、点検・調査箇所数をむやみに増やすことは現実的ではない。このため、調査位置や調査数とリスクの関係についても、今後検討する必要があると考えられる。

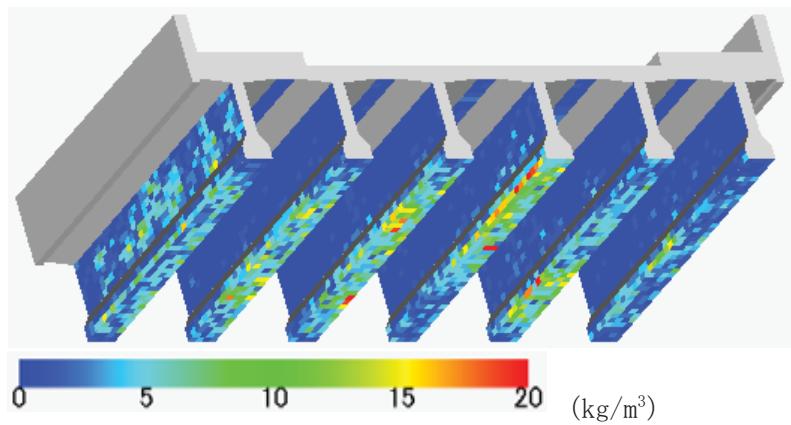


図 3-13 歌高架橋 ランダムウォーク法による付着塩分量の解析結果